

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ НАНОСТРУКТУРНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Кудрявцев Е.А.

Руководитель – профессор, доктор технических наук Салищев Г.А.

Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, г. Белгород
kudryavtsev@bsu.edu.ru

Перевод двухфазных титановых сплавов в наноструктурное состояние позволяет снизить температуру сверхпластической деформации на несколько сот градусов ниже наблюдаемой в сплавах с обычной микроструктурой [1]. Например, в ВТ6 с размером зерна 300 нм сверхпластическое течение наблюдалось при 600°C, причем удлинение составило 500%, коэффициент $m=0,37$ [2], а работе [3] в том же сплаве с таким же размером зерна было получено удлинение 296% и $m = 0,34$ при той же температуре. Снижение удлинения с понижением температуры деформации ожидаемо из-за торможения диффузии и ускоренного роста зерен, вследствие уменьшения объемной доли β -фазы. Однако, увеличение протяженности границ с уменьшением размера зерна, отличающихся от тела большой диффузионной проницаемостью должно компенсировать эти потери. Исходя из этого, целью настоящей работы является изучение структурных изменений и механического поведения титанового сплава ВТ6 со средним размером зерна 135 нм при сверхпластической деформации при экстремально низкой температуре 550°C.

Двухфазный титановый сплав ВТ6 был поставлен в виде горячекатаного прутка (температура полиморфного превращения 990°C). Образцы для исследований были получены изотермической мультисековой деформацией с последующей прокаткой. Испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной машине Instron в температурном интервале 450-600°C со скоростью перемещения траверсы 0,5-100 мм/мин. Коэффициент скоростной чувствительности m был рассчитан из наклона кривой испытаний с изменением скорости деформации [1]. Структура сплава была исследована с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3, просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 и растрового электронного микроскопа Quanta 600

В наноструктурном состоянии микроструктура сплава представляла собой глобулярные α и β зерна со средним размером зерна 135 нм. Предварительные исследования показали, что рост зерен при нагреве происходит уже при $T=550^\circ\text{C}$. С увеличением времени отжига зерна заметно укрупняются и после 5 часов отжига этот процесс протекает

медленнее. Объемная доля β -фазы в сплаве составляла $\sim 10\%$ и не сильно изменялась в ходе отжига.

Исследование механических свойств сплава показало, что с повышением температуры деформации растет пластичность и снижается напряжение течения (Рис. 1а). При $T=550^\circ\text{C}$ и $\dot{\varepsilon}=5\times 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ удлинение достигает 640%. Изучение скоростной зависимости механических характеристик при $T=550^\circ\text{C}$ позволило установить оптимальный режим сверхпластичности (Рис. 1б). При скорости деформации $2\times 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ были получены максимальные значения удлинения ($\delta=1000\%$) и коэффициента m (0.47).

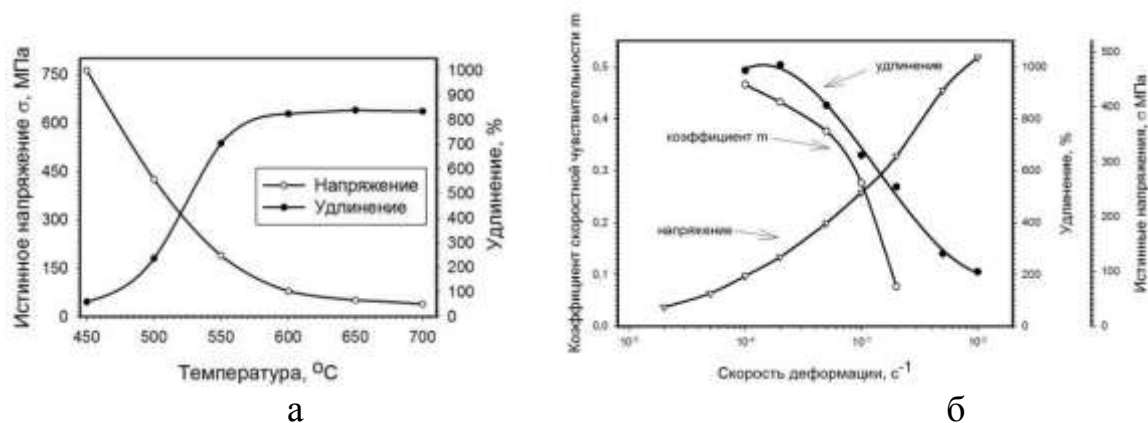


Рисунок 1 – Изменение механических характеристик сплава ВТ6 (а) от температуры деформации при $\dot{\varepsilon}=5 \cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ и (б) от скорости деформации при температуре 550°C .

Оценка кажущейся энергии активации сверхпластической деформации дала значение $Q=149\text{ кДж/моль}$ при $n=2$, которая близка величинам энергии активации 176 и 160 кДж/моль полученным, соответственно, в работах [3,4]. Она близка также энергии активации зернограницной диффузии 189 кДж/моль для обычного сплава ВТ6.

При $T=550^\circ\text{C}$ было исследовано влияние скорости и степени деформации на микроструктуру сплава. С уменьшением скорости деформации наблюдается существенное укрупнение зерен. При $\varepsilon = 100\%$ средний размер зерна составил 290 нм при $\dot{\varepsilon}=5\times 10^{-3}\text{ c}^{-1}$, 490 нм при $\dot{\varepsilon}=2\times 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ и 530 нм при $\dot{\varepsilon}=2\times 10^{-5}\text{ c}^{-1}$. График на рис. 1б представляет деформационно-индуцированный рост зерен при $\dot{\varepsilon}=2\times 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ и $T=550^\circ\text{C}$. Видно, что деформация существенно ускоряет рост зерен в сплаве в сравнении с отжигом. Причем некоторые зерна α -фазы достигают к степени деформации 800% 1400 нм. При этом укрупнение зерен не выводит сплав из состояния сверхпластичности. Коэффициент скоростной чувствительности m равен 0.52, 0.62 и 0.65, соответственно, для степеней деформации 100, 200, и 500%. При этом в оптимальных условиях не обнаруживается порообразования в сплаве.

Исследование эволюции кристаллографической текстуры в ходе

отжига и сверхпластической деформации выявило существенные ее изменения. Отжиг слабо влияет на текстуру. Однако, увеличение степени деформации от 100 до 500% при оптимальной скорости деформации $\dot{\varepsilon}=2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ведет размытию полюсной фигуры. Отметим, что фактор Керна, рассчитанный из полюсной плотности, снижается по сравнению с исходным состоянием с 0,55 до 0,42 при достижении деформации в 500% и скорости $2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Такие структурные изменения могут быть связаны с развитием зернограницного проскальзывания.

Измельчение размера зерна до 135 нм делает возможным проявление сверхпластичности при экстремально низкой для сплава ВТ6 температуре - 550°C с высокими значениями коэффициента скоростной чувствительности и относительного удлинения. Известно [1], что сверхпластическое поведение двухфазных сплавов наиболее ярко наблюдается при отношении объемной доли α/β фаз близким к 1. Рассматриваются две причины [1]: зернограницное проскальзывание осуществляется легче по межфазным границам, а микроструктура более стабильная в этом состоянии. Между тем наноструктурный сплав ВТ6, в котором при $T=550^\circ\text{C}$ доля β -фазы лишь $\sim 10\%$, показывает сопоставимые значения относительного удлинения. При этом оценка энергии активации, сохранение равноосности зерен, размытие текстуры однозначно свидетельствуют в пользу главного механизма деформации зернограницного проскальзывания. Вероятно, такое необычное поведение связано с ускоренным ростом зерен в процессе сверхпластического течения (Рис. 1б), который снимает перенапряжения, возникающие при деформации. Косвенно, - это подтверждает факт отсутствия пор в образцах после деформации.

Список литературы

- [1] O.A. Kaibyshev: *Superplasticity of Alloys, Intermetallides and Ceramics* (Springer-Verlag, Berlin 1992).
- [2] G.A. Salishchev et al., Submicrocrystalline and nanocrystalline structure formation in materials and search for outstanding superplastic properties, *Mater. Sci. Forum* 170-172 (1994) 121-130.
- [3] Y.G. Ko et al., Low-temperature superplasticity of ultra-fine-grained Ti-6Al-4V processed by equal-channel angular pressing, *Metall. Mater. Trans.* 37A (2006) 381-391.
- [4] G.A. Sargent et al., Low-temperature coarsening and plastic flow behavior of an α/β titanium billet material with an ultrafine microstructure, *Metall. Mater. Trans.* 39A (2008) 2949-2964.